第 42 卷 第 1 期 天 文 学 进 展 Vol. 42, No. 1
2024 年 3 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Mar., 2024

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.07

基于 LAMOST DR8 光谱搜寻白矮星

蔡靖豪[1,2,3,4]，韩占文[1,2,3,4]，邢丽峰[1,3,4]，任娟娟[5]，李 蛟[5]

(1. 中国科学院 云南天文台，昆明 650216； 2. 中国科学院大学，北京 100049； 3. 中国科学院 天体结构与演化重点实验室，昆明 650011； 4. 云南省国际超新星研究重点实验室，昆明 650216； 5. 中国科学院 国家天文台，北京 100101)

摘要： 白矮星是中小质量恒星演化末期残留的简并内核，是宇宙中绝大多数恒星的演化归宿。白矮星的大样本观测性质不仅可以为恒星演化理论提供检验与约束，还可以被用于研究银河系的形成历史与演化。结合 Gaia 的高精度测光和周年视差数据，在 LAMOST 第八次数据发布 (DR8) 低分辨率光谱数据中搜寻白矮星。通过使用模版匹配的方法，在 LAMOST DR8 中共找到 4 692 颗白矮星和 85 颗激变变星，其中 2 876 个目标在之前的工作中已经被证认为白矮星，1 854 个目标为首次在 LAMOST 中发现的白矮星。目视确认后对白矮星光谱型进行了详细的分类。经过对比，该白矮星样本的完备性为 80%，分类的准确性达到 99%，最终得到的 LAMOST 白矮星很好地反映不同类型的白矮星在 Gaia CMD 图上的分布。

关 键 词： 白矮星；光谱；LAMOST

中图分类号： P145.5 **文献标识码：** A

1 引 言

1.1 白矮星简介

白矮星是中小质量恒星演化末期残留的简并恒星内核。初始质量 $M < 7.0\ M_{\odot}$ 的恒星最终会演化成白矮星。这类恒星在经历演化末期的渐近巨星支 (asymptotic giant branch, AGB) 顶端的双壳层核燃烧时，星风将绝大部分富H包层抛射，留下一个电子简并的 C-O 内核。而初始质量 $7.0\ M_{\odot}<M < 11.0\ M_{\odot}$ 的恒星根据金属丰度和质量损失率的差别会产生不同的演化产物，包括 O-Ne 白矮星、电子俘获超新星和 Fe 核坍缩超新星[1]。

此外，白矮星也可能是多星系统演化的产物。理论上，质量小于 $(0.3 \sim 0.45)\ M_{\odot}$ 的白矮星只能被解释为密近双星演化的产物[2]，因为这种小质量白矮星的单个前身星的主序寿命

收稿日期： 2023-05-05； **修回日期：** 2023-05-26

资助项目： 国家自然科学基金 (12090043, 12288102)

通讯作者： 蔡靖豪，1260328017@qq.com

超过了宇宙年龄。理论上认为极小质量白矮星 (extremely low mass white dwarf, ELMWD)，即质量小于 $(0.2 \sim 0.3)\ M_{\odot}$ 的白矮星[3, 4]的形成机制是：双星系统在公共包层或稳定的洛希瓣物质转移阶段之后，演化的恒星丢失了外包层，使恒星内核暴露[5]。当内核处于简并状态时丢失外包层质量，但没有触发 He 聚变，就会产生 ELMWD。ELMWD 的表面重力加速度近似于亚矮星，但有效温度通常较低 ($T_{\rm eff} \leqslant 20\,000$ K)。热亚矮星则是在内核触发 He 燃烧后，包层丢失的结果，因此它们位于零龄水平分支 (zero-age horizontal branch, ZAHB) 上。另外，据估计 25% ~ 30% 的白矮星是并合后演化产生的。

白矮星的光度与矮星的相近甚至更加暗弱，但其温度较高所以颜色更蓝，在赫罗图上位于主序恒星的左下方。白矮星的光度范围超过 7 个数量级，已知的最暗白矮星的光度 $L \approx 10^{-4.7}\ L_{\odot}$，而刚刚进入冷却演化轨迹的白矮星的光度可达 $L \approx 10^{2} \sim 10^{3}\ L_{\odot}$[6]。由于核反应燃料的消耗殆尽，白矮星仅仅通过非简并离子储存的热能和微弱的引力收缩提供辐射的能量，这一过程被称为白矮星的冷却。白矮星的平均质量约为 $0.6\ M_{\odot}$，半径与地球半径接近。由于电子简并压与温度无关，所以白矮星演化时其半径基本恒定。白矮星的冷却时间非常长，典型白矮星冷却至 3 000 K 大约需要 10 Ga[6]。考虑到白矮星前身星的核燃烧历史和引力沉降作用，典型白矮星的 C-O 内核周围是一个薄的富 He 壳层，富 He 壳层又被一个富 H 壳层包围。尽管这些壳层非常薄，但它们对辐射极其不透明，控制着白矮星能量的向外传输，因此在白矮星冷却过程中发挥着至关重要的作用。其中 H 壳层和 He 壳层的确切质量与厚度问题已成为该领域的一个研究热点问题。

白矮星的冷却过程不仅构成一个基本的物理问题，为致密等离子体物理理论提供了独立的验证，还使得白矮星冷却演化轨迹作为各个星族独立的年龄和距离指标成为可能。即从不同质量白矮星的冷却程度差异得到的理论光度函数 (luminosity function, LF) 在低光度端的下降趋势，可以作为约束银河系各星族 (例如银盘、球状星团和疏散星团) 年龄和历史的独立指标。利用多色光度测量和光谱学可以精确测定白矮星的有效温度、重力加速度，再根据理论质量-半径关系可以得到白矮星的质量。这些基本参数对恒星演化理论的一些重要问题提供了约束和改正，例如，AGB 阶段的质量损失率、恒星内部旋转轮廓和角动量损失、基本核反应速率等。白矮星的质量分布可以反映不同金属丰度下的初始质量函数、初始-终止质量关系。另外，质量函数还可以用于研究双星演化在某些白矮星形成中的作用。银河系中超过 97% 的恒星预计最终演化为白矮星，因此白矮星星族的性质提供了研究银河系恒星形成历史和演化的宝贵信息。白矮星的光度函数可以衡量局部中小质量恒星的死亡率，可以从光度函数中反演恒星形成率和恒星形成历史 (star formation history, SFH)，并且在已有的研究中已被用于确定薄盘的年龄。由于白矮星的前身星在 AGB 阶段抛射了大量的 C、N、O 元素，所以白矮星在银河系化学演化中扮演了重要角色。而白矮星星族性质的研究需要大量的、定义明确的白矮星样本。

1.2　白矮星的分类

根据表面包层大气的主要成分，白矮星被分为两种不同的主要类别。大约 80% 的白矮星仅显示 H 的巴尔末谱线，其表面大气主要由 H 元素组成，被归类为 DA 型白矮星。这类白矮星有效温度在 5 000 K 以上。其余大约 20% 的白矮星表面大气成分主要为 He 元素，大

气中缺少 H 元素，被归类为非 DA 型白矮星。非 DA 型白矮星包含几个子类：温度最高的被称为 DO 型白矮星，$4.5\times10^4\ \mathrm{K}\lesssim T_{\mathrm{eff}}\lesssim 2\times10^5\ \mathrm{K}$，其光谱中显示了一次电离 He (He II) 线，同时 H 的巴尔末线和中性 He (He I) 线也在光谱中可见；温度较低的被称为 DB 型白矮星，通常 $1.1\times10^4\ \mathrm{K}\lesssim T_{\mathrm{eff}}\lesssim 3\times10^4\ \mathrm{K}$，其光谱仅存在 He I 线；DZ 型白矮星的光谱主要显示金属线 (Ca II K 和 Ca II H 线占主导)，有效温度通常小于 1.1×10^4 K；DQ 型白矮星的光谱显示 C_2 斯旺分子谱带 (C_2 Swan band) 或中性 C (C I) 线，有效温度通常也小于 1.1×10^4 K。此外，对于少量超冷的 H 大气白矮星 ($T_{\mathrm{eff}}\lesssim 5\,000$ K) 和超冷的 He 大气白矮星 ($T_{\mathrm{eff}}\lesssim 1.1\times10^4$ K)，它们显示出无特征谱线的平滑连续谱，被归类为 DC 型白矮星。图 1 为不同类型白矮星的典型光谱。

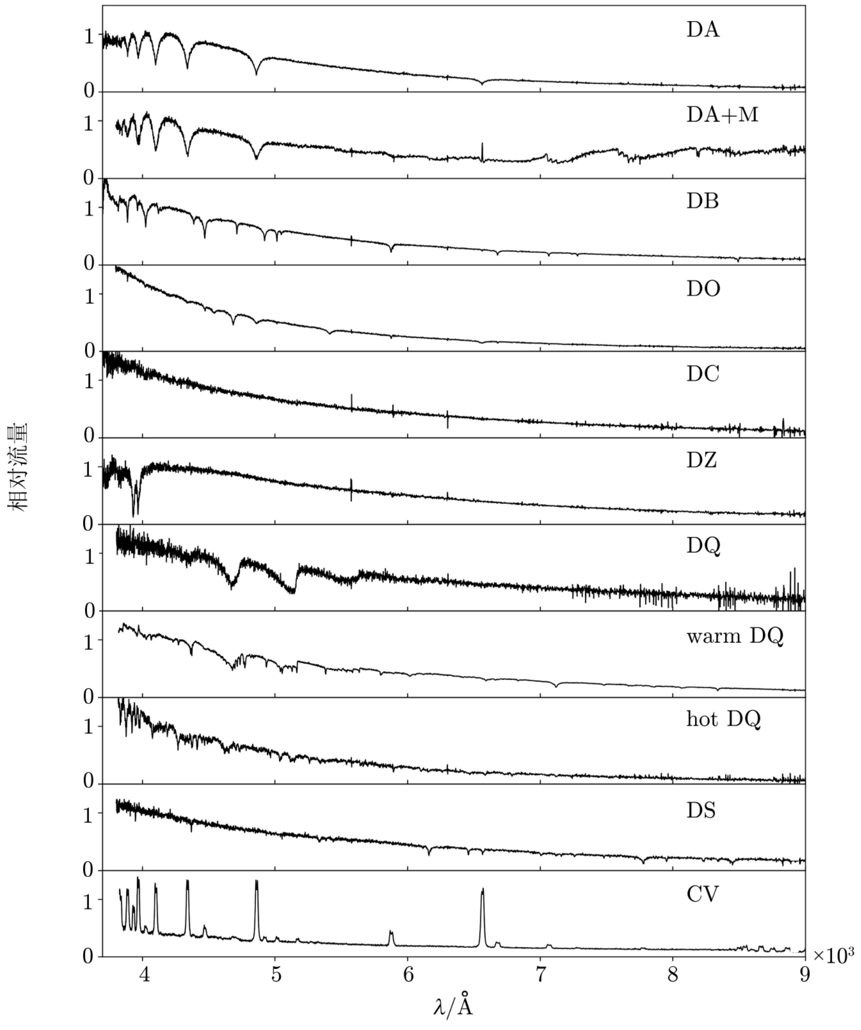


图 1　不同类型白矮星 (DA、DB、DO、DC、DZ、DQ、DS)、白矮星主序双星 (DA+M) 与激变变星 (CV) 的典型光谱

已有观测证据表明，单颗白矮星的光谱类型可能会随着冷却过程而演化，即光谱中的主导元素发生变化。这表明白矮星表面大气成分可能受到对流、质量损失、吸积、辐射悬浮和引力沉降等作用的影响。随着冷却的进行，DO 型白矮星光谱由 He II 线主导转化为 He I 线主导，白矮星类型由 DO 型转化为 DB 型。然而 DO 型到 DB 型之间的过渡温度区间 ($3\times10^4 \lesssim T_{\rm eff} \lesssim 4.5\times10^4$ K) 只观测到少量的缺 H 白矮星，被称为 DB 缺失 (DB-gap)。但这一区间存在一些混合大气类型的白矮星、以 C II 线主导光谱的“热 DQ”型白矮星，以及少量富 O 大气白矮星 (DS 型)。已知 DA 型白矮星与非 DA 型白矮星的数量之比是有效温度的函数[6]。这表明可能是对流或引力沉降作用使一些原本高温的缺 H 白矮星 (PG 1159 恒星或 DO 型) 大气中的少量 H 逐渐到达大气表层，并漂浮于 He 包层顶层，形成一种富 H 大气[7, 8]。而在 DB 缺失的下边缘，可能是由于更大质量的对流 He 包层的发展稀释了薄的 H 辐射层，又将 H 主导大气转变为 He 主导大气。超过一半 DB 型白矮星是显示了弱 H 线的 DBA 型白矮星，说明在较低的温度下，H 包层较薄的 DA 型白矮星可能由于对流作用开始向 DB 型白矮星转变。

大约 3% 的白矮星显示出金属污染 (主要是 Ca II K 和 Ca II H 线)，这只能用冷的白矮星吸积星际介质或星周物质 (如小行星) 来解释[9]。除了非常热的天体 ($T_{\rm eff} \gtrsim 5\times10^4$ K)，辐射悬浮效应仍然对金属线的出现起重要作用[10]。在极少数情况下，He 包层下的对流区足够深以致可以把 C 拖拽到表面，因此这些白矮星光谱显示 C_2 分子谱带或 C 原子谱线，形成 DQ 型白矮星。更罕见的是那些拥有富 O 大气层以及少量的 Ne、Mg 元素的白矮星，光谱以 O 线为主，没有 H 和 He 线，它们被归类为 DS 型白矮星。

1.3 白矮星的观测及搜寻

早期由于大口径和高精度巡天望远镜的缺乏，观测发现并证认的白矮星数量非常有限。白矮星的搜寻工作包括：在自行星表中观测蓝色暗星、寻找紫外超天体等。McCook 和 Sion[11] 于 1977 年发布了第一个光谱证认的白矮星星表。由于受到当时设备和技术的限制，发现的白矮星偏向于热星、运动速度较快的星、有较大半径和较小质量的星[12]。

近 20 年来，得益于 SDSS (Sloan Digital Sky Survey)、GALEX (Galaxy Evolution Explorer)、Gaia (Global astrometric interferometer for astrophysics)、LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope) 等大面积高精度巡天项目的开展，针对大样本白矮星的高效搜寻已经得以实现。

迄今为止发布的具有数量最多的且经过光谱证认的白矮星星表来自 SDSS。SDSS 项目使用一架位于美国新墨西哥州阿帕奇天文台，口径为 2.5 m 的望远镜。该项目希望通过获取海量天体的测光和光谱数据，来加深对星系的形成和演化、宇宙的大尺度结构等领域的理解。SDSS 光谱的获取使用了不同光谱仪。SDSS-I/II 光谱仪的波长覆盖范围为 $3\,800 \sim 9\,200$ Å，分辨率为 $1\,850 \sim 2\,200$；BOSS 光谱仪的波长覆盖范围为 $3\,650 \sim 10\,400$ Å，其分辨率在 3 800 Å 处为 1 500，在 9 000 Å 处为 2 200。最新的 SDSS 白矮星星表是 Kepler 等人[13] 建立的。他们基于 SDSS DR14 数据，根据 Eisenstein 等人[14] 选择的白矮星颜色范围、大于 20 $\rm mas \cdot a^{-1}$ 的 3σ 自行以及 SDSS Pipeline 软件分类的热星，对白矮星候选体进行了初步筛选。随后他们检查了所有候选体的光谱以确认谱线特征，并最终得到了 37 053 颗源的

总星表，其中 20 088 颗是白矮星。除了白矮星以外，星表还包含热亚矮星 (sdOs、sdOBs、sdBs)、激变变星 (CVs)、窄氢线天体 (sdAs)、碳星 (dCs)。基于 SDSS DR16，他们又报告了新证认的 2 410 颗包含白矮星的天体及光谱分类[15]。Kepler 等人[13, 15]使用 Koester[16]的大气模型，对他们星表中所有 $S/N_{\rm g} \geqslant 10$ 的白矮星及热亚矮星进行了拟合，然后测定了 $T_{\rm eff}$、$\lg g$ 值，最后估计了 DA、DB、DC、DZ 型白矮星的质量值。

LAMOST 巡天以其高效获取海量光谱数据的优势成为白矮星搜寻的又一个重要来源。目前已经有几项基于 LAMOST 低分辨率光谱数据的白矮星搜寻工作被发表。Zhang 等人[17]通过使用 Sérsic 轮廓拟合 Balmer 谱线并结合目视确认，从先导巡天中发现了 230 颗 DA 型白矮星。通过使用 LAMOST Pipeline 分类的光谱类型，将 Sérsic 轮廓拟合到 Balmer 谱线，进行颜色-颜色切割，并最终加以目视确认的方法，Guo 等人[18]在 DR2 中发现了 1 056 颗 DA、34 颗 DB 和 276 颗白矮星主序双星。Kong 等人[19]使用套索算法 (LASSO) 和支持向量机 (SVM) 的机器学习方法，在 DR5 中确定了 287 颗 DB 型白矮星。同样的方法也正被应用于之后的 LAMOST 数据发布中。此外，LAMOST 中白矮星主序双星的搜寻工作从未停止。Ren 等人[21]开发了一种基于小波变换的算法，可以检测光谱蓝端的 Balmer 线和红端的分子吸收带，在 DR5 中识别了 876 颗白矮星主序双星。随着 LAMOST 光谱数据的不断释放，白矮星的搜寻与证认工作有待进一步开展。

2 数据来源

我们使用 LAMOST 先导巡天与前 8 年正式巡天的低分辨率光谱数据，结合 Gaia EDR3 天体测量和光度测量数据，在 LAMOST 光谱数据库中搜寻白矮星，扩大 LAMOST 的白矮星样本。

2.1 Gaia 数据

Gaia 是欧空局继 HIPPARCOS 之后的又一项基础任务，意在精确测量超过 10 亿颗恒星的三维空间和三维速度分布，并确定它们的天体物理性质，如表面重力和有效温度，以绘制银河系领域内精确的恒星三维地图，理解银河系的结构、形成和演化。

Gaia 卫星的成像依靠两架口径为 1.45 m × 0.5 m 的望远镜，并搭载了天体测量仪、光度计、视向速度光谱仪三个终端仪器，用于测量恒星的位置、自行、视差、亮度和光谱。其中视差的测量精度首次达到微角秒级，G 波段极限星等达到 20 mag。Gaia 卫星于 2013 年 12 月发射升空并位于日地拉格朗日 L2 点进行观测。经过半年的调试和性能验证，正式科学运行从 2014 年夏季开始。第一批数据 (DR1) 和第二批数据(DR2)已分别于 2016 年和 2018 年释放。本工作使用了 2020 年发布的第三批早期数据发布 EDR3。它是完整版的 DR3 数据集的一部分，基于 2014 年 7 月 25 日到 2017 年 5 月 28 日之间 34 个月收集的数据，涵盖超过 18 亿个天体目标。EDR3 发布的内容包括更新后的源列表、赤经、赤纬、视差、自行、G、$G_{\rm Bp}$、$G_{\rm Rp}$ 波段宽带测光星等及来自 DR2 的视向速度更新列表。其中 8.82 亿个源具有 6 个天体测量参数 (赤经、赤纬、视差、赤经自行、赤纬自行、伪颜色)，5.85 亿个源具有 5

个天体测量参数 (没有伪颜色)，3.44 亿个源只具有平均位置 (几乎为暗弱天体)。

与 DR2 相比，EDR3 的视差测量精度平均提高了 20% ~ 30%，自行测量精度是之前的 2 倍。另外，光度测量不仅在天球的分布上，在目标的星等和颜色的分布上也都更均匀。星表还包含了新的诊断参数，以便于进行更可靠的质量切割。

2.2 LAMOST 数据

“大天区面积多目标光纤光谱望远镜” (LAMOST) 又称为郭守敬望远镜，是一台有效口径达 3.6 ~ 4.9 m 的中星仪式反射施密特望远镜，位于河北省承德市兴隆县的中国科学院国家天文台兴隆观测基地。主体由北面的反射施密特修正镜 Ma、南面的球面主镜 Mb 和中间的焦面构成。观测时，球面主镜与焦面固定于地面上，当目标经过中天附近时由修正镜进行追踪。由于修正镜创造性地采用了主动光学技术，突破了望远镜大口径与大视场不能兼得的技术瓶颈，是目前世界上投入运行的口径最大的大视场巡天望远镜。焦面直径为 1.75 m，采用并行可控式光纤定位技术同时控制 4 000 根光纤的实时位置。以上技术的实现使 LAMOST 具有 20 平方度的大视场，能在一次曝光中同时对 4 000 颗目标在红蓝两端拍摄光谱，成为世界上光谱获取率最高的望远镜。LAMOST 低分辨率巡天具有 16 台光谱仪，每台与 250 根光纤和 2 个 CCD 相机相连。红端波长覆盖范围为 5 700 ~ 9 000 Å，蓝端波长覆盖范围为 3 700 ~ 5 900 Å，分辨率约为 1 800。单个目标平均曝光时间为 1.5 h，极限星等可达到 17.8 mag。光谱仪拍摄的星光被光栅色散后的二维谱带图像，经过 LAMOST 2D Pipeline 软件抽谱、除平场、定标、减天光、红蓝端数据合并等流程后得到一维光谱，在经过 LAMOST 1D Pipeline 软件进行模板匹配、分析、光谱分类、红移测量、参数测量、打包封装等操作后，产生星表等数据产品。LAMOST 低分辨率光谱巡天的主要科学目标包括银河系的结构和演化、天体人口普查、特殊天体搜寻 (富Li巨星、贫金属星、超高速星、白矮星等)、系外行星搜寻、恒星形成、近邻星系的形成与演化、类星体搜寻等。

3 数据处理

我们使用 LAMOST DR7 以及正式巡天第八年的低分辨率光谱数据与 Gaia EDR3 的星表进行交叉匹配。LAMOST 使用的光纤的直径为 3″，同时光纤指向的误差平均不超过 1.5″，因此综合考虑这两个因素之后决定采用 3″ 的交叉半径。于是我们得到了 1 045 万条具有 Gaia 测光数据的 LAMOST 光谱，且这些光谱目标的绝对星等可以由下式得出：

$$G_{\mathrm{abs}} = g_{\mathrm{mm}} - 5 \times \lg\left(\frac{1000}{p}\right) + 5 \quad , \tag{1}$$

其中，G_{abs} 是 Gaia g 波段的绝对星等，g_{mm} 是 Gaia g 波段的平均测光星等，p 是 Gaia 的周年视差，单位是毫角秒。

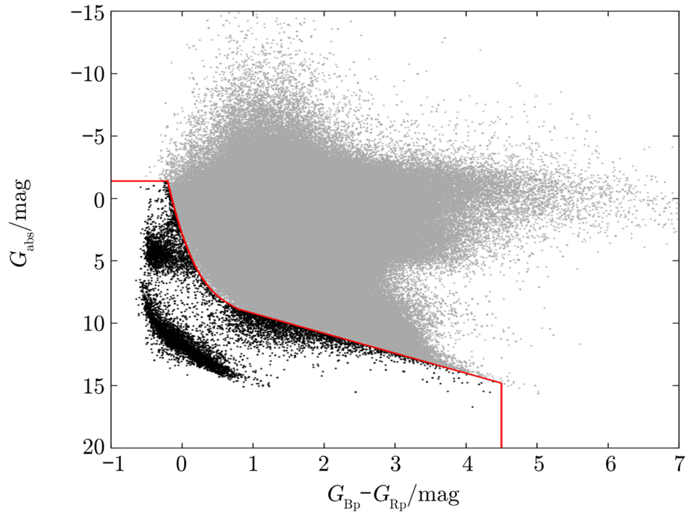
在为所有 LAMOST 光谱检索了 $G_{\mathrm{Bp}} - G_{\mathrm{Rp}}$ 颜色之后，我们在 Gaia CMD 图中给出了这些天体的分布情况，如图 2 所示。为了确定白矮星及污染天体在 CMD 图中的分布，我们使用 Kepler 等人[13] 从 SDSS DR14 中识别出的包含白矮星及污染天体的星表与 Gaia EDR3

星表进行交叉匹配。在获取 SDSS 天体的 Gaia 测光数据后，把它们与所有 LAMOST 天体画在同一幅 CMD 图中，如图 3 所示。图 3 中，由灰色点代表的 LAMOST 天体集中分布的大片区域的边缘对应主序恒星所在区域的边缘，由蓝色点所代表的白矮星则主要集中分布于 $6.5 \leqslant G_{\rm abs} \leqslant 15$ mag、$-0.6 \leqslant G_{\rm Bp} - G_{\rm Rp} \leqslant 1.5$ mag 且与主序分离的区域。从图 3 可知，白矮星主导的区域与热亚矮星、后 AGB 星、sdA 星等其他污染天体部分重叠，因此根据 Gaia CMD 图选择白矮星必然引入额外的天体。为了使我们的选择更高效，即尽可能完整地将 LAMOST 中的白矮星选出并排除掉大量主序星，我们沿着图中主序的边缘定义了一组切割关系：

$$\begin{cases} G_{\rm abs} > -1.3875 \\ G_{\rm abs} > 7.5 \times ((G_{\rm Bp} - G_{\rm Rp}) + 0.1)^3 + 20 \times ((G_{\rm Bp} - G_{\rm Rp}) + 0.1)^2 + \\ \qquad 20.8 \times ((G_{\rm Bp} - G_{\rm Rp}) + 0.1) + 0.9 \end{cases} , \tag{2}$$

或者

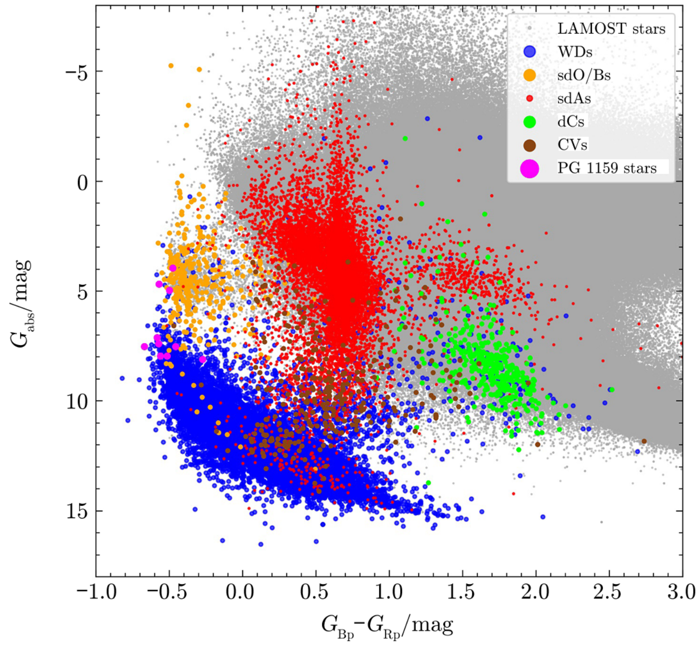
$$\begin{cases} G_{\rm Bp} - G_{\rm Rp} < 4.5 \\ G_{\rm abs} > 1.6 \times (G_{\rm Bp} - G_{\rm Rp}) + 7.6075 \end{cases} . \tag{3}$$



注：黑色点为筛选的白矮星候选体。

图 2　LAMOST DR8 数据发布中所有天体在 Gaia CMD 图中的分布

选出的白矮星候选体由图 2 中黑色点所示，包含 14 851 条光谱。为了进行白矮星的识别，我们使用模版匹配并辅以目视检查的方法。我们筛选 SDSS DR14 中已知的 $S/N_{\rm g} \geqslant 50$ 的各类型白矮星光谱 (包括 DA、DB、DO、DC、DZ、DQ、DS、DA+M、CV)，并将其分辨率降至 LAMOST 光谱的分辨率以作为模版。对 $S/N_{\rm g} \geqslant 10$ 的白矮星候选体，将其光谱在白矮星光谱特征集中的波长范围 (主要在蓝端) 与模版光谱进行匹配；最后对匹配为白矮



注：蓝色点为白矮星与白矮星双星，棕色点为激变变星，橙色点为热亚矮星，绿色点为碳矮星，红色点为 sdA 恒星，粉色点表示 PG 1159 恒星。

图 3　LAMOST DR8 天体 (灰色点) 与 SDSS DR14 白矮星星表中被分类的天体 (彩色点) 在 Gaia CMD 图中的分布

星的光谱进行目视确认，并同时予以分类。对 $S/N_{\rm g} < 10$ 的白矮星候选体，直接对其进行目视检查，如果光谱在目视范围内符合白矮星特征，则将其分类为高置信度白矮星候选体。目视确认之前，我们将 SDSS DR14 白矮星光谱与 LAMOST DR8 中的同源光谱进行一一对应，并目视学习不同类型白矮星在 SDSS 和 LAMOST 中的特征。

观测上白矮星的分类是根据光谱的特征谱线来进行的。不同类型白矮星的特征谱线反映了白矮星的表面大气结构和化学成分、有效温度、表面重力加速度、磁场强度等物理参数。在熟悉了各类型白矮星光谱后，我们采用以下标准来目视确认和分类 LAMOST DR8 中的所有白矮星候选体。

(1) H I 巴尔末线通常较宽，伴随剧烈的巴尔末衰减 (DA、DAB、DBA、DZA 和亚矮星)；

(2) He I 线，4 471 Å (DB、亚矮星)；

(3) He II 线，4 686 Å (DO、PG 1159、sdO)；

(4) C_2 天鹅分子带或原子 C I 线 (DQ)；

(5) Ca II H&K 线 (DZ、DAZ、DBZ)；

(6) C II 线，4 367 Å (热 DQ)；

(7) 塞曼分裂 (磁白矮星，用 H 标记)；

(8) 具有显著自行的无特征谱 (DC)；

(9) 红端流量增加 (双星，很可能是 M 矮星)；

(10) O I 线，6 158 Å、7 774 Å、8 448 Å (DS，O 主导)；

(11) H 和 He 的发射线 (激变变星或 M 矮星)。

此外，一些额外的标记也被添加到上述白矮星主类型中用以辅助或细化分类。

(1) E：存在发射线；

(2) ?：表示不确定的分类，也可以用冒号 (:)；

(3) X：特殊或不可分类的光谱；

(4) V：表示变星的可选符号；

(5) d：存在环星周尘埃。

通常白矮星的光谱比其他类型的恒星更简单，只存在特定白矮星类型对应的几种元素谱线 (H、He、Ca、C、O 元素)，这反映了白矮星简单的大气组成，最多存在几种特征谱线混合的光谱。我们在分类时遵循的原则是：任意一种白矮星类型的特征谱线在光谱中占据主导地位，则将该类型作为主要类型；如果还出现了其他类型的特征谱线，但强度在光谱中相对主要谱线较弱，则将对应类型的标记添加在主要类型之后作为亚型。

4 结果与讨论

经过模版匹配和目视确认所有的光谱后，在 LAMOST DR8 数据中，我们发现了 4 777 个独立的目标，对应 6 032 条光谱，其中 4 692 个目标为白矮星，其余的 85 个目标为激变变星系统。经过与已经发布的 LAMOST 白矮星星表对比，我们星表中的 2 876 个目标在之前的工作中已被证认为白矮星，1 854 个目标在 LAMOST 中首次被识别为白矮星。

目视检查完所有 14 851 条光谱后，最后的分类结果如表 1 所示。此外在分类时，我们对肉眼可见的光谱特征都进行了标记，对于光谱中较弱的特征也将其添加到白矮星主要类型后作为亚类。表中的分类是对所有主类型相同的目标的总和。

表 1 LAMOST DR8 中 14 851 条候选体光谱的白矮星识别和分类结果

类型	数目	类型	数目
DA	3 805	PG1159	7
DB	333	DA+M	257
DO	34	DA+K	1
DC	108	DA+dC	3
DZ	68	DB+M	8
DQ	68	CV	85

我们把在 LAMOST DR8 中识别的白矮星星表与 SDSS DR14 的白矮星星表进行对比后发现：DC 型白矮星在 SDSS 所有白矮星中的比例高达 9%，而在我们所用的 LAMOST

DR8 数据中 DC 型白矮星的占比只有 2%。我们分析，这可能是因为 DC 型白矮星光度较低，而 LAMOST 的极限星等小于 SDSS，因此 LAMOST 只能观测到极少数的邻近冷白矮星。此外，SDSS DR14 中的绝大多数 DC 型白矮星只拥有 10 以下的信噪比，而此类距离较远的冷白矮星在 LAMOST 中的光谱信噪比极低，以致我们无法分辨光谱轮廓，因此我们无法确定那些信噪比小于 10 的冷白矮星。

将我们在 LAMOST DR8 中识别的白矮星与最近发布的 SDSS DR16 白矮星同时表征在 Gaia CMD 图中，研究不同类型白矮星的分布，见图 4。

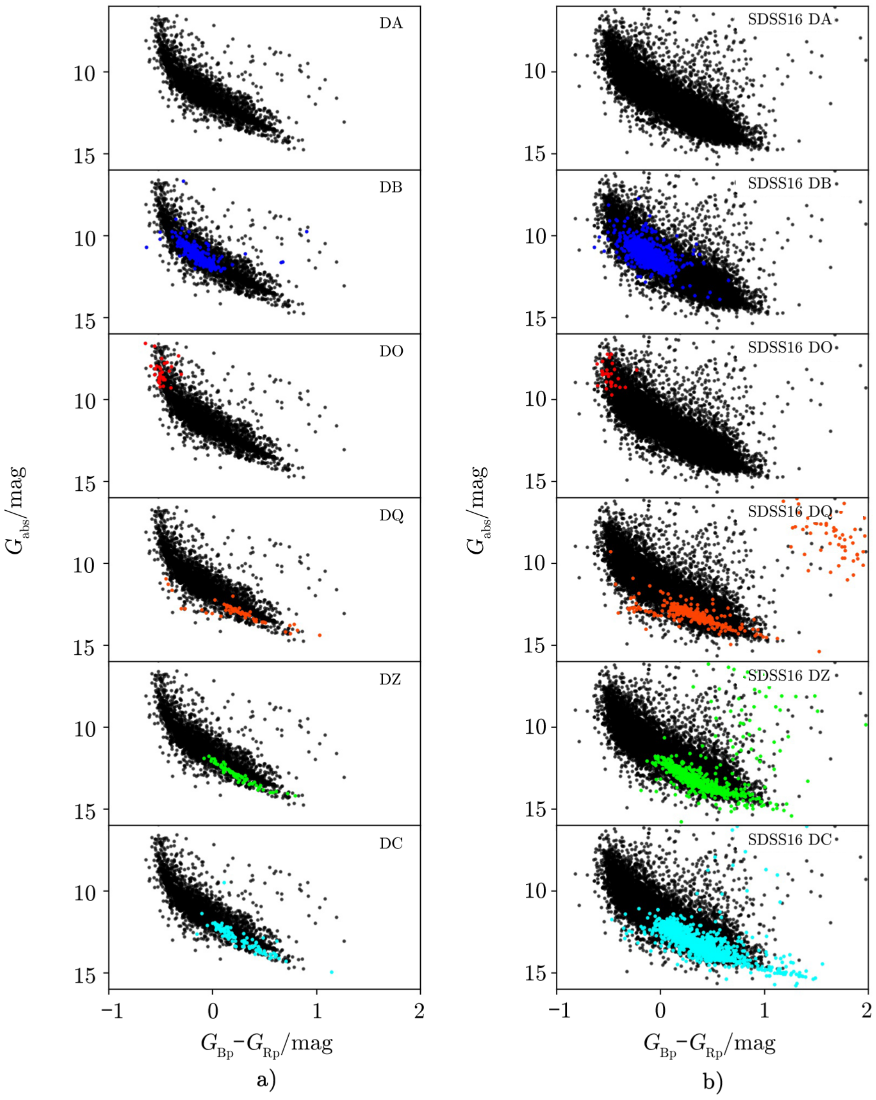


图 4　a) 应用 LAMOST DR8 数据识别的白矮星在 Gaia CMD 图上的分布；b) SDSS DR16 白矮星在 Gaia CMD 图上的分布

如图 4 所示，DA 型白矮星的分布呈现为黑色圆点所在区域，且分布范围最广，其余各类型白矮星只在特定区域呈现成团性分布。DO 型白矮星分布在白矮星密集区的左上部，即白矮星冷却序列的起点，而 DB 型白矮星分布在颜色更红、绝对星等值更大的区域。DO 型白矮星与 DB 型白矮星之间存在一个缺氢白矮星不连续分布的地带，即所谓的 DB-gap。DQ、DZ、DC 型白矮星的分布轨迹有一定重叠，但 DQ 白矮星的分布存在着明显的额外“结构”。对于冷白矮星，使用我们的方法在 LAMOST 数据中只能识别到 $G_{\rm Bp}-G_{\rm Rp}\leqslant 0.9$ mag 的位置，而 SDSS 可以识别到 $G_{\rm Bp}-G_{\rm Rp}\approx 1.5$ mag 的白矮星低温端。可以看出，我们识别的 LAMOST DR8 白矮星的分布与 SDSS 白矮星基本一致。将我们的白矮星星表与 SDSS DR16 白矮星星表交叉后，2 571 颗共同目标中有 20 颗目标在白矮星主要类型及白矮星主序双星的分类结果上不一致，因此该星表对白矮星的分类准确性达 99%。表 2 为部分 LAMOST DR8 白矮星星表数据。

为了得到该白矮星样本的完备性，我们将其与 Gaia EDR3 白矮星星表[22]中 359 073 颗高置信度白矮星 ($P_{\rm WD}>0.75$) 候选体数据进行交叉匹配，在共同源中检索我们识别的白矮星。由此得到的白矮星样本完备性为 80%。

本篇论文的白矮星星表数据 (DOI: 10.57760/sciencedb.08123) 可在中国科学院科学数据银行 (https://www.scidb.cn/s/3MFFzy) 中访问获取，供天文学家开放使用。

参考文献：

[1] Woosley S E, Heger A. ApJ, 2015, 810: 34
[2] Kilic M, Stanek K Z, Pinsonneault M H. ApJ, 2007, 671: 761
[3] Sun M, Arras P. ApJ, 2018, 858: 14
[4] Calcaferro L M, Althaus L G, Córsico A H. A&A, 2018, 614: A49
[5] Li Z, Chen X, Chen H-L, Han Z. ApJ, 2019, 871: 148
[6] Fontaine G, Brassard P, Bergeron P. PASP, 2001, 113: 409
[7] Fontaine G, Wesemael F. IAU, 1987, 95: 319
[8] Manseau P M, Bergeron P, Green E M. ApJ, 2016, 833: 127
[9] Koester D, Gänsicke B T, Farihi J. A&A, 2014, 566: A34
[10] Barstow M A, Barstow J K, Casewell S L, et al. MNRAS, 2014, 440: 1607
[11] McCook G P, Sion E M. Villanova University Observatory Contributions. Villanova: Villanova Press, 1977
[12] Shipman H L. ApJ, 1979, 228: 240
[13] Kepler S O, Pelisoli I, Koester D, et al. MNRAS, 2019, 486: 2169
[14] Eisenstein D J, Liebert J, Harris H C, et al. ApJS, 2006, 167: 40
[15] Kepler S O, Koester D, Pelisoli I, et al. MNRAS, 2021, 507: 4646
[16] Koester D. Mem Soc Astron Italiana, 2010, 81: 921
[17] Zhang Y Y, Deng L C, Liu C, et al. AJ, 2013, 146: 34
[18] Guo J, Zhao J, Tziamtzis A, et al. MNRAS, 2015, 454: 2787
[19] Kong X, Luo A L, Li X R. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(6): 088
[20] Guo J, Zhao J, Zhang H, et al. MNRAS, 2022, 509: 2674
[21] Ren J J, Rebassa-Mansergas A, Parsons S G, et al. MNRAS, 2018, 477(4): 4641
[22] Gentile Fusillo N P, Tremblay P E, Cukanovaite E, et al. MNRAS, 2021, 508(3): 3877

表 2　部分 LAMOST DR8 白矮星星表数据

光谱编号	目标名称	赤经	赤纬	分类	观测日期	儒略日	g 波段信噪比	文件名称
593011139	J000325.32+504633.9	0.855238	50.776097	DA	2017-10-16	58043	3.13	spec-58043-GACII000N48B1_sp11-139.fits.gz
472901108	J000416.52+153146.9	1.068867	15.52972	DA	2016-10-29	57691	5.48	spec-57691-EG000313N173308M01_sp01-108.fits.gz
472901125	J000441.75+152841.1	1.1739757	15.478096	DA	2016-10-29	57691	3.62	spec-57691-EG000313N173308M01_sp01-125.fits.gz
402602081	J011817.61+384249.3	19.5734	38.713713	DA+M	2016-01-07	57395	8.4	spec-57395-M31021N40M2_sp02-081.fits.gz
178151188	J010314.12+392918.9	15.808873	39.488602	DB	2011-12-18	55914	5.14	spec-55914-M31_01h38_F1_sp15-188.fits.gz
500611180	J000743.40+382754.9	1.9308634	38.465258	DC	2016-12-24	57747	21.07	spec-57747-M31002N36B2_sp11-180.fits.gz
796904052	J072621.21+363311.9	111.5884	36.5533278	DO	2020-01-30	58879	6.28	spec-58879-GAC111N36M1_sp04-052.fits.gz
486905026	J014704.50+313006.9	26.768752	31.501927	DQ	2016-12-02	57725	7.98	spec-57725-M31027N32M1_sp05-026.fits.gz
475316011	J001953.80+424849.1	4.9741793	42.813643	DZ	2016-11-02	57695	5.63	spec-57695-M31007N41M1_sp16-011.fits.gz
1003092	J004457.00+380350.7	11.237511	38.064107	PG1159	2011-10-27	55862	20.2	spec-55862-M6201_sp03-092.fits.gz

Searching for White Dwarfs Based on LAMOST DR8 Spectrum

CAI Jing-hao[1,2,3,4], HAN Zhan-wen[1,2,3,4], XING Li-feng[1,3,4],
REN Juan-juan[5], LI Jiao[5]

(1. Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 4. International Centre of Supernovae, Yunnan Key Laboratory, Kunming 650216, China; 5. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: White dwarfs are the degenerate stellar cores remaining at the end of the evolution of low- and median-mass stars, which represent the final fate of more than 97% of the celestial bodies in the Milky Way. White dwarfs contain the information of stars from birth to death, which can be used to constrain the theory of stellar evolution, such as the mass loss rate in the post-AGB stage at the end of stellar evolution, which also directly affects the initial-final mass relation of stars. White dwarfs may arise from the evolution of multiple star systems. It is estimated that 25% $\sim$ 30% of white dwarfs are the outcome of binary or multiple star mergers, and white dwarfs with a mass less than 0.4 $M_{\odot}$ are generally considered to be the result of binary evolution. Therefore, white dwarfs can be used to verify the binary star evolution theory. The white dwarf cooling sequence provides an independent cosmic clock to constrain the ages of the various stellar populations in the Milky Way. Since the white dwarf population contain information about the formation history and evolution of the Milky Way, and the study of the properties of the white dwarf population requires a large number of well-defined white dwarf samples. Combining Gaia's high-precision photometry and annual parallax data, we searched for white dwarfs in the low-resolution spectroscopic data of the eighth data release (DR8) of LAMOST. By using the method of template matching, a total of 4 692 white dwarfs and 85 cataclysmic variables were found in LAMOST DR8, among which 2 876 objects were proved to be white dwarfs in the previous work, and 1 854 objects were white dwarfs discovered in LAMOST for the first time. After visual confirmation, we carried out a detailed classification of the white dwarf spectral types. After comparison, the completeness of the white dwarf sample is 80%, and the accuracy of classification is 99%. The final LAMOST white dwarf sample can well reflect the distribution of different types of white dwarfs on the Gaia CMD map.

Key words: white dwarf; spectra; LAMOST